

文章编号:1001-5078(2008)05-0489-05

· 图像与信号处理 ·

雷达与双波段红外探测器融合跟踪系统

潘平俊, 冯新喜, 刘英坤, 孙鹏, 李鸿艳
(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 利用双波段红外探测系统测到的目标双波段红外辐射信息, 推导出目标的伪距离量测信息, 使得单站红外探测系统变为可观测系统; 在此基础上, 采用带反馈的分布式估计融合算法, 将雷达与双波段红外探测系统得到的局部航迹进行融合, 并将每次融合估计的结果反馈给局部传感器, 使得融合中心达到最优性能的同时, 减小了雷达和红外局部估计的误差。仿真结果表明: ① 单站红外探测系统利用目标的双波段红外辐射信息能够对目标进行有效地跟踪, 跟踪精度较高; ② 带反馈的分布式估计融合算法具有良好的跟踪性能, 而且能够明显改善局部传感器的跟踪精度。

关键词: 雷达; 双波段红外探测系统; 红外光谱辐射功率; 带反馈的分布式估计融合

中图分类号: TN951; TP751

文献标识码: A

The Fusion and Tracking System Based on Radar and Infrared Sensor with Dual Bands

PAN Ping-jun, FENG Xin-xi, LIU Ying-kun, SUN Peng, LI Hong-yan

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: By using the infrared radiation information of the target observed by infrared sensor with double bands, the pseudo-range information of the target is deduced and it causes infrared sensor with double bands in single observer becomes to be observable. Furthermore, the distributed fusion algorithm with feedback in fusion center is chosen to fuse the tracks from radar and infrared sensor with dual bands. After every fusion is finished, the results of fusion is sent back to radar and infrared sensor and that makes the tracking performance of the fusion center to be optimal and the estimate errors of radar and infrared sensor to be reduced. The simulation results show that single infrared sensor with dual bands can track effectively target by using the infrared radiation information of the target, and the fusion algorithm with feedback has not only better performance of target tracking, but also can improve obviously the tracking performance of radar.

Key words: radar; infrared sensor with dual bands; infrared radiation power; the distributed fusion with feedback

1 引言

雷达和红外(IR)传感器组成的系统是一类典型的异类多传感器融合系统。雷达作为主动传感器, 能够提供目标较为完整的信息(如距离、方位和俯仰角), 但是雷达存在低空盲区、易遭受电子干扰和反辐射导弹攻击等缺点。而IR传感器作为重要的被动探测手段, 通过接收目标辐射的热能进行探

测和定位, 具有较强的抗干扰能力、测角(包括方位和俯仰角)精度高和目标识别能力强等优点, 但IR传感器存在不能直接提供目标的距离、作用距离较

作者简介: 潘平俊(1977-), 男, 博士研究生, 助工。主要研究领域为多传感器数据融合, 机动目标跟踪, 多传感器管理。E-mail: ppjlq1977@163.com; ppj1977@126.com

收稿日期:2007-10-23; 修订日期:2007-12-11

近和受气候影响等缺点。如何将IR传感器和雷达两种传感器观测到的信息完美融合,充分发挥红外和雷达两种传感器的互补性,使得相得益彰,是近年来国内外专家学者研究的热点^[1]。

由于仅有角度信息的红外单站对机动目标跟踪不容易实现,存在可观测性问题^[2],因此目前针对雷达和红外融合跟踪的大多数算法^[3-5]主要是量测级融合,将红外跟踪作为一种辅助手段。实际上,IR传感器通常还可获得目标的红外辐射功率等信息。文献[6]、[7]利用目标的红外辐射信息,将相邻两次测量的目标红外光谱辐射功率之比作为伪测量,研究了单波段IRST系统的机动目标跟踪问题。文献[8]研究了IRST系统的被动测距问题。文献[9]提出了利用双波段IRST系统进行目标定位的单站测距算法。

本文借鉴文献[9]的思想,在双波段IR系统的角度测量信息的基础上,利用其得到的目标的双波段红外辐射信息,推导出目标的距离信息,使IR系统由弱可观测系统变为可观测系统,从而可以利用适用于雷达等主动传感器的各种跟踪算法;然后,在融合中心采用带反馈的分布式融合算法将雷达和红外系统传来的局部航迹进行融合。仿真结果表明,基于双波段红外辐射信息,单站红外传感器能够有效地跟踪目标;与不带反馈的融合算法相比,带反馈的融合算法具有相同的跟踪精度,但雷达的跟踪误差大大减小,而且在多目标跟踪的场合,降低了雷达和红外传感器的误关联率。

2 雷达与双波段红外融合系统结构

双波段IR系统探测到的目标双波段红外辐射信息之后,先进行数据预处理,得到目标的伪距离量测信息,与所探测到的角度信息组合后传送至跟踪滤波器,形成目标航迹,然后再将目标航迹传送给融合中心与雷达传来的目标航迹进行融合,得到目标的融合航迹。每次融合过程完成后,融合中心再将最后的融合结果传送给雷达、红外探测器,进行下一时刻的目标预测、跟踪。系统的结构框图如图1所示。

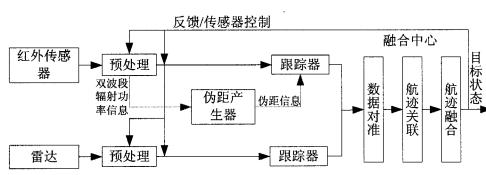


图1 雷达与双波段红外融合系统结构框图

3 算法设计

3.1 双波段IR系统被动测距方法

红外探测到的目标光谱辐射功率可表示为^[9]:

$$P_\lambda = \frac{J_\lambda A_0 K e^{-\mu_\lambda R}}{R^2} \quad (1)$$

式中, J_λ 为目标在 λ 波段的红外光谱辐射强度; μ_λ 为 λ 波段的大气衰减系数; A_0 为光学系统的接收面积; K 为光学系统透过率; R 为目标到探测器之间的距离。

设红外探测系统的1波段为3~5μm波段,2波段为8~12μm波段,第*i*个时刻目标到探测器之间的距离为*R(i)*,探测器在两个波段所测得的目标红外辐射功率分别为:

$$\begin{aligned} P_{\lambda_1}(i) &= \frac{J_{\lambda_1} A_0 K_{\lambda_1} e^{-\mu_{\lambda_1} R(i)}}{R^2(i)} \\ P_{\lambda_2}(i) &= \frac{J_{\lambda_2} A_0 K_{\lambda_2} e^{-\mu_{\lambda_2} R(i)}}{R^2(i)} \end{aligned} \quad (2)$$

由于IR系统的采样频率比较高,假设在连续两次采样时刻目标的红外光谱辐射强度 J_λ 保持不变,即 J_λ 为未知常量。设第(*i*-1)个时刻目标到探测器之间的距离为*R(i-1)*,则:

$$\begin{aligned} P_{\lambda_1}(i-1) &= \frac{J_{\lambda_1} A_0 K_{\lambda_1} e^{-\mu_{\lambda_1} R(i-1)}}{R^2(i-1)} \\ P_{\lambda_2}(i-1) &= \frac{J_{\lambda_2} A_0 K_{\lambda_2} e^{-\mu_{\lambda_2} R(i-1)}}{R^2(i-1)} \end{aligned} \quad (3)$$

令:

$$\begin{aligned} P_1(i) &= \frac{P_{\lambda_1}(i-1)}{P_{\lambda_1}(i)} \\ &= \frac{R^2(i)}{R^2(i-1)} \cdot e^{-\mu_{\lambda_1}[R(i-1)-R(i)]} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_2(i) &= \frac{P_{\lambda_2}(i-1)}{P_{\lambda_2}(i)} \\ &= \frac{R^2(i)}{R^2(i-1)} \cdot e^{-\mu_{\lambda_2}[R(i-1)-R(i)]} \end{aligned} \quad (5)$$

利用式(1)~式(5),经推导可得:

$$\begin{aligned} R(i) &= \frac{1}{\mu_{\lambda_2} - \mu_{\lambda_1}} \cdot \ln \left(\frac{P_1(i)}{P_2(i)} \right) / \\ &\quad \left[\left(\frac{[P_1(i)]^{\mu_{\lambda_2}}}{[P_2(i)]^{\mu_{\lambda_1}}} \right)^{\frac{1}{\mu_{\lambda_1} - \mu_{\lambda_2}}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

利用式(6)得到的伪距离量测和探测器获得的角度量测信息(方位角和俯仰角),构造探测系统的伪量测方程,使得探测系统由弱可观测变为可观测。

3.2 雷达与双波段红外的量测方程

双波段IR系统可获得目标的方位角 θ_{IR} ,俯仰角 η_{IR} , $3\sim5\mu m$ 和 $8\sim12\mu m$ 两个波段的红外辐射功率 $P_{\lambda_1},P_{\lambda_2}$ 。应用上节的方法,利用连续两个时刻的两个波段的红外辐射功率 $P_{\lambda_1},P_{\lambda_2}$ 可计算得到目标到探测器之间的距离为 $r_{IR}(k)$ 。同样,雷达也可探测到目标的方位角 θ_R 、俯仰角 η_R 和径距 r_R 。两者具有相同形式的量测方程。简便起见,省略了下标。

第 k 时刻,方位角 $\theta(k)$ 、俯仰角 $\eta(k)$ 及 $r(k)$ 与目标位置之间的关系可表示为:

$$\theta(k) = \arctan(y(k)/x(k)) \quad (7)$$

$$\eta(k) = \arctan(z(k)/\sqrt{x(k)^2 + y(k)^2}) \quad (8)$$

$$r(k) = \sqrt{x(k)^2 + y(k)^2 + z(k)^2} \quad (9)$$

则量测方程表示为:

$$Y(k) = h(X(k)) + V(k) \quad (10)$$

式中, $Y(k) = [\theta(k) \ \eta(k) \ r(k)]^T$; $V(k)$ 是均值为零,方差为 $R = \text{diag}(\sigma_\theta^2, \sigma_\eta^2, \sigma_r^2)$ 的高斯观测噪声。

3.3 目标运动方程

目标的离散状态方程为:

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + U(k)\bar{a} + W(k) \quad (11)$$

式中, $X(k) = [x(k) \ \dot{x}(k) \ \ddot{x}(k) \ y(k) \ \dot{y}(k) \ \ddot{y}(k) \ z(k) \ \dot{z}(k) \ \ddot{z}(k)]^T$ 。

$$\Phi(k+1, k) = \begin{pmatrix} G & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 1 & T & A \\ 0 & 1 & B \\ 0 & 0 & C \end{pmatrix},$$

$$U(k) = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & M \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} D \\ E \\ F \end{pmatrix},$$

$$A = (-1 + \alpha T + e^{-\alpha T})/\alpha^2;$$

$$B = (1 - e^{-\alpha T})/\alpha; C = e^{-\alpha T};$$

$$D = (-T + \alpha T^2/2 + B)/\alpha; E = T - B; F = 1 - C.$$

式中, $\bar{a} = [\bar{a}_x \ \bar{a}_y \ \bar{a}_z]$ 为机动加速度均值; α 为机动频

率; T 为采样周期; $W(k)$ 为零均值、方差为 $Q(k) = 2\alpha\sigma_a^2q$ 的离散时间白噪声序列; $\sigma_a^2 = [\sigma_{ax}^2, \sigma_{ay}^2, \sigma_{az}^2]$ 为目标加速度方差; q 为与 T 有关的常数矩阵。

3.4 雷达与双波段红外的跟踪算法

1)数据关联。考虑到算法的实时性,雷达和红外均采用最近邻算法^[1]进行数据关联。

2)自适应跟踪。采用改进的“当前”统计模型自适应跟踪算法^[10],该算法采用截断正态分布表征目标的机动加速度特性,考虑风速和加速度估计均值的影响,对机动加速度与方差自适应关系修正,自适应补偿过程噪声协方差矩阵,从而具有更好地跟踪机动目标的能力。由于量测方程是非线性的,因此在雷达与红外跟踪算法中均采用基于最小偏度单形采样的UKF算法^[11]。

3.5 带反馈的分布式估计融合算法

设第 k 时刻雷达和红外传感器送至融合中心的航迹信息分别为 $\{\hat{x}_{k|k}^R, P_{k|k}^R, \hat{x}_{k|k-1}^R, P_{k|k-1}^R\}$ 和 $\{\hat{x}_{k|k}^{IR}, P_{k|k}^{IR}, \hat{x}_{k|k-1}^{IR}, P_{k|k-1}^{IR}\}$,则融合中心的融合估计值以及相应的估计误差协方差阵分别为^[1]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k} = & P_{k|k}^{-1} \hat{x}_{k|k-1} + \\ & \lfloor (P_{k|k}^R)^{-1} \hat{x}_{k|k}^R - (P_{k|k-1}^R)^{-1} \hat{x}_{k|k-1}^R \rfloor + \\ & [(P_{k|k}^{IR})^{-1} \hat{x}_{k|k}^{IR} - (P_{k|k-1}^{IR})^{-1} \hat{x}_{k|k-1}^{IR}] \end{aligned} \quad (12)$$

$$P_{k|k} = P_{k|k}^R - P_{k|k}^R (P_{k|k}^R + P_{k|k}^{IR} - P^*)^{-1} (P_{k|k}^R - P^*) \quad (13)$$

式中, $P^* = P_{k|k}^{IR} [(P_{k|k-1}^R)^{-1} + (P_{k|k-1}^{IR})^{-1} - P_{k|k-1}^{-1}] P_{k|k}^R$

融合中心向雷达、红外存在反馈时,雷达、红外的一步预测及相应的预测误差协方差阵改为:

$$\hat{x}_{k|k-1}^R = \hat{x}_{k|k-1}^{IR} = \hat{x}_{k|k-1} \quad (14)$$

$$\hat{P}_{k|k-1}^R = \hat{P}_{k|k-1}^{IR} = P_{k|k-1} \quad (15)$$

文献[1]已经证明,带反馈的航迹融合算法,与中心式融合算法具有相同的性能。在航迹融合过程中引入反馈的主要优势是可以减小局部估计误差的协方差,即 $\hat{P}_{k|k}^R \leq P_{k|k}^R, \hat{P}_{k|k}^{IR} \leq P_{k|k}^{IR}$ 。由于最近邻数据关联算法“唯一性”的选择落在相关跟踪门之内且与被跟踪目标预测位置最近的观测作为关联对象,因此,引入反馈机制后,可以提高局部传感器的正确关联率,这一点在后面的仿真中得到了验证。

4 仿真结果

为了验证算法的有效性,对两个目标平行、交叉飞行两种情况进行了计算机仿真分析,并与不带反馈的融合算法^[1]进行了比较。仿真是在直角坐标系X-Y平面内进行的。仿真次数100次。假设雷达和红外已经过数据校准,且同平台配置,扫描周期均为T=1s。雷达的方位角测量误差为0.02rad,距离测量误差为100m;IRST系统的方位角测量误差为0.2mrad,目标在3~5μm和8~12μm两个波段的红外光谱辐射强度分别J₁=500W·sr⁻¹,J₂=600W·sr⁻¹,为两个波段的大气衰减系数分别为μ₁=0.8km⁻¹,μ₂=0.6km⁻¹,设IRST系统的探测距离为25km,测量噪声均方差为目标在25km处所接收到的光谱辐射功率的10%。目标运动模型参数设置:机动时间常数的倒数α=1/60,α_{max}取100m/s²。在上述仿真参数设置的条件下,对两个目标平行、交叉飞行两种情况的monte carlo仿真结果分别如图2~图5、图6~图9所示(其中,图3,5,7,9中的嵌入部分为局部放大图)。限于篇幅,这里仅给出带反馈和不带反馈融合算法的目标1的位置估计误差比较图,对于目标2,有相同的结果。

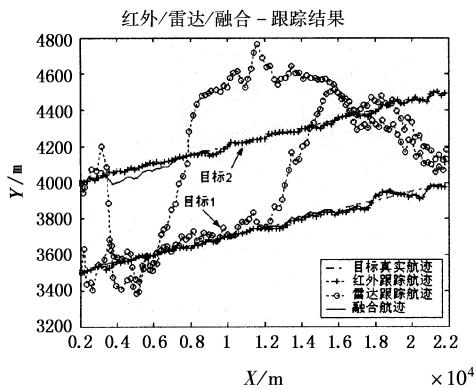


图2 不带反馈情况下,雷达/红外/融合跟踪航迹

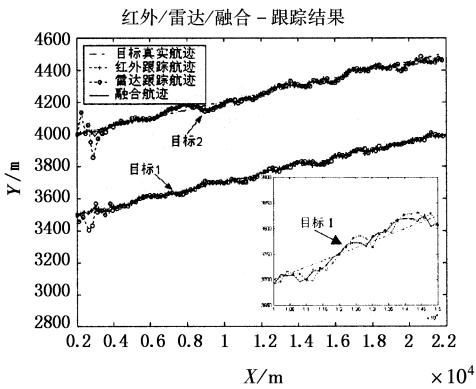


图3 带反馈情况下,雷达/红外/融合跟踪航迹

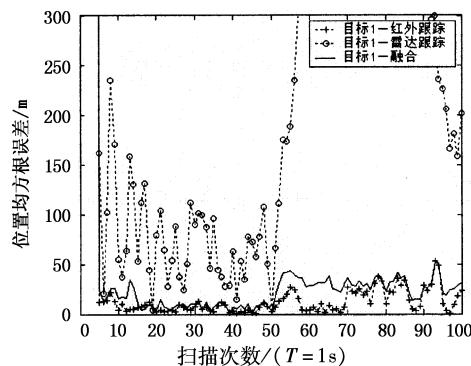


图4 不带反馈情况下,目标1位置估计的均方误差

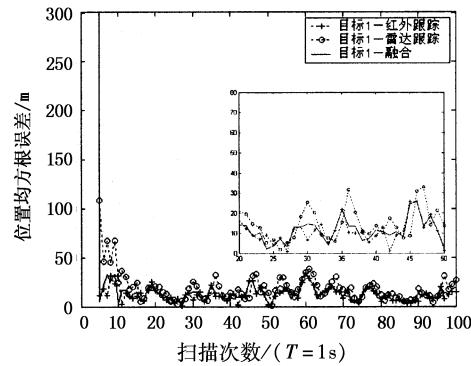


图5 带反馈情况下,目标1位置估计的均方误差

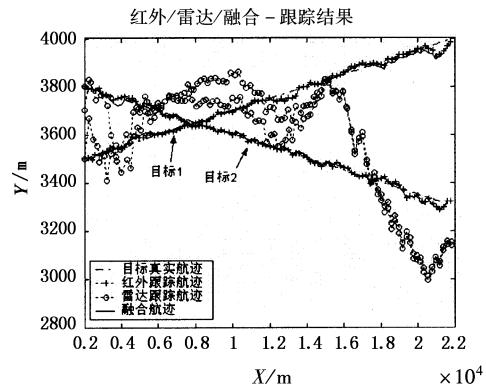


图6 不带反馈情况下,雷达/红外/融合跟踪航迹

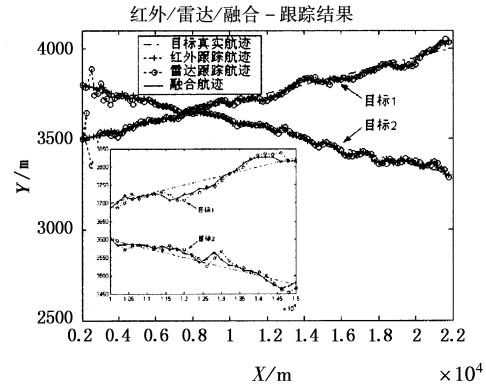


图7 带反馈情况下,雷达/红外/融合跟踪航迹

从图2~图9可以看出,在仿真设置的两种场合中,单站双波段红外探测器利用探测到的目标双波段红外辐射信息,均能够对目标进行有效地跟踪,

而且跟踪误差较小。此外,从图2和图3、图6和图7可以看出,与不带反馈的融合算法相比,带反馈的融合算法都能够对两个目标进行有效地跟踪;而且由于两个目标间距较小(500m),采用不带反馈的融合算法时,雷达(测量误差较大)跟踪航迹出现误相关、航迹合并的情况,而采用带反馈的融合算法,则没有出现这种情况。这是由于带反馈的融合算法引入了反馈机制,减小了局部估计误差,提高了局部传感器的正确关联率。另外,从图4和图5、图8和图9可以看出,对于目标平行和交叉飞行两种情况,采用带反馈的融合算法时,雷达、红外及融合中心对目标的位置估计误差均较小,跟踪性能比较稳定,整个跟踪过程,误差不超过50m;而采用不带反馈的融合算法时,雷达、红外及融合中心对目标的位置估计误差较大,且跟踪性能波动较大,特别是雷达对目标的位置估计误差很大,且在跟踪后期出现发散的情况,这是因为雷达对目标进行了误关联,初始阶段,两目标间距离较近,雷达对目标的估计误差对融合中心的影响不大,随时间的推移,雷达对目标的估计误差越来越大,以致失去了对目标的跟踪能力,从而导致融合中心的跟踪性能变差。

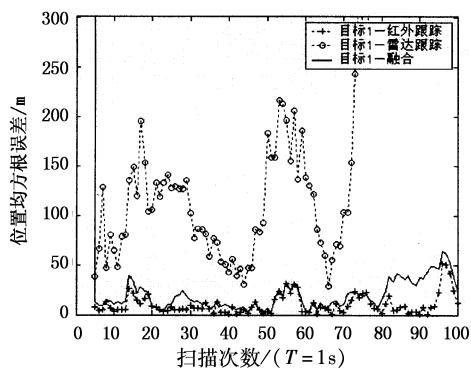


图8 不带反馈情况下,目标1位置估计的均方误差

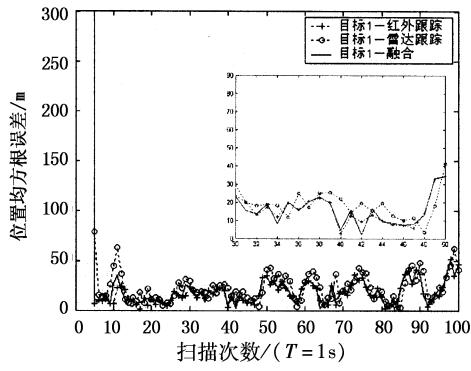


图9 带反馈情况下,目标1位置估计的均方误差

5 结束语

本文利用双波段IR系统测到的目标双波段红外辐射信息,推导出目标的伪距离量测信息,构建了伪量测方程,使得单站IR系统变为可观测系统;然后,将单站IR系统与雷达各自跟踪到的目标航迹传送至融合中心应用带反馈的分布式融合算法进行航迹融合。反馈机制的引入使得在融合中心达到最优性能的同时,减小了雷达和单站IR系统局部估计的误差,从而降低了雷达和单站IR系统的错误关联率。仿真结果验证了基于双波段红外辐射信息的单站红外探测器的目标跟踪方法和带反馈的分布式融合算法的有效性。

参考文献:

- [1] 韩崇昭,朱洪艳,段战胜,等.多源信息融合[M].北京:清华大学出版社,2006:424-425.
- [2] E Hammd, V J Aidala. Observability requirements for three-dimensional tracking via angle measurements [J]. IEEE Trans. On AES, 1985, 21(2):200-207.
- [3] 王青,黄燕,石晓荣.雷达/红外双模制导背景下的模糊目标跟踪器[J].系统仿真学报,2003,15(8):1152-1154.
- [4] 王晓华,敬忠良,陈非,等.红外与激光主/被动联合跟踪算法[J].红外与激光工程,2001,30(4):219-225.
- [5] Shetty S, et al. A multisensor tracking system with an image-based maneuver detector [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(1):167-181.
- [6] 辛云宏,杨万海.基于红外辐射信息IRST系统机动目标跟踪算法[J].红外技术,2004,26(3):37-44.
- [7] 辛云宏,杨万海.IRST系统的单站机动目标跟踪算法研究[J].光子学报,2004,33(9):1131-1135.
- [8] 钱铮铁.一种用于红外警戒系统的被动测距方法[J].红外与毫米波学报,2001,20(4):311-314.
- [9] 辛云宏,杨万海,王保平.一种基于双波段的红外搜索与跟踪系统的单站测距方法[J].红外技术,2004,26(1):5-8.
- [10] 潘平俊,冯新喜.一种修正的机动目标模型及自适应滤波算法[J].现代防御技术,2007,35(4):132-136.
- [11] S J Julier, J K Uhlmann. Reduced sigma point filters for the propagation of means and covariances through nonlinear transformations[C]//Proc. Am. Contr. Conf., Anchorage, AK, 2002, 887-892.